

***В.А. СЕВОСТЬЯНОВ,
В.И. МИТЬКО***

О РАЗВИТИИ ОХЛАЖДЕНИЯ РОТОРОВ (ЯКОРЕЙ) ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Розглянуто питання удосконалення охолодження електричних двигунів постійного і змінного струму, захищеного і закритого виконання потужністю 3000 кВт і більше.

Рассмотрены вопросы совершенствования охлаждения электрических машин постоянного и переменного тока, защищенного и закрытого исполнения, мощностью 3000 кВт и выше

Електрические машины потребляют 60-70 % электроэнергии; Украина закупает за рубежом 100 % меди, электротехнической стали и электроизоляции.

Развивающийся необратимый кризис истощения невозобновляемых энергетических и сырьевых минеральных ресурсов выдвигает перед электромашиностроителями две главные физически взаимосвязанные и взаимоисключающие задачи: повышение энергетических показателей и снижение материалоемкости электрических машин.

Проблемой создания энергоэкономичных электрических машин ведущие мировые электромашиностроительные фирмы стали заниматься после мирового энергетического кризиса 1973 г. В результате этого они изменили концепцию проектирования электрических машин. В основу проектирования было положено значительное увеличение энергетических показателей машин. В общепромышленных асинхронных двигателях было достигнуто увеличение к.п.д. на 3-7 %, $\cos \phi$ на 10-15 %. Это было достигнуто в основном за счет увеличения расхода материалов на 20-30 % [1].

В 1970-1977 гг. ряд зарубежных фирм Японии (Фудзицу Фанук), ФРГ («Сименс»), Великобритании («Хьюг Скотт»), а в 1977-1980 гг. в СССР (НИИ завода «Электромашина», г. Прокопьевск, совместно с ВНИПТИЭМ, г. Владимир) освоили промышленное производство специальных высокомоментных электродвигателей постоянного и переменного тока с центробежной тепловой трубой (ЦТТ) в валу и независимой вентиляции. Применение ЦТТ в валу якоря (ротора) позволило в 1,7-2,0 раза повысить длительный момент и на 25-50 % уменьшить их массу. В дальнейшем японская фирма «Хитачи» освоила асинхронные двигатели с ЦТТ в валу для привода насосов и вентиляторов [3].

В дальнейшем парк электрических машин будет непрерывно возрастать, особенно машин с регулируемой частотой вращения, что приведет к дальнейшему увеличению потребления электроэнергии и расхода материалов.

Цель статьи: изложить результаты обобщения работ [2, 3, 4, 5, 6 и др.], выполненных за рубежом и в СССР за период 1970-1995 гг., в том числе в УкрНИИВЭ (г. Донецк), и представить разработанный на этой основе общий подход – концепцию по конструированию систем охлаждения роторов (якорей) ЦТТ электрических машин постоянного и переменного тока специального и общепромышленного исполнения мощностью до 3000 кВт и выше.

Для охлаждения роторов разработаны две основные конструкции ЦТТ: вал-ЦТТ с двумя модификациями: с внутренней цилиндрической или конической зоной конденсации (рис. 1) [3] и с трубчатой зоной конденсации (рис. 2) [5] и эксцентриковые ЦТТ, располагаемые в пазах или аксиальных каналах ротора [4] и охлаждаемые наружным воздухом.

Для увеличения теплопередачи от ЦТТ к наружному воздуху на поверхности их зоны конденсации размещают кольцевые или продольные ребра. Для двигателей с постоянной частотой вращения устанавливается на валу вентилятор (осевой или центробежный), который одновременно является радиатором и предусматривает последовательный обдув ребер ЦТТ и корпуса двигателя. В двигателях с глубоким регулированием частоты вращения ребра зоны конденсации охлаждаются вентилятором с независимым приводом.

В малых и средних машинах (до 90-110 кВт) тепло ротора отводится через вал, выполненный в виде ЦТТ, рис. 1, 2 в средних и крупных машинах (110-3000 кВт) тепло ротора отводится через эксцентриковые ЦТТ, установленные в аксиальных каналах (пазах) ротора, рис. 3. В машинах с переменной и регулируемой частотой вращения охлаждение ЦТТ осуществляется принудительной вентиляцией, рис. 4.

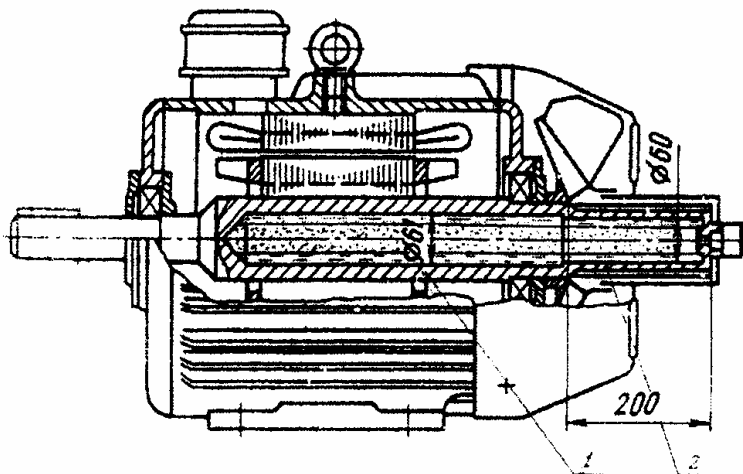


Рис. 1. Двигатель 4AC160M4 с ЦТТ 1 и радиатором 2 в виде продольных ребер (мощность 7-75 кВт)

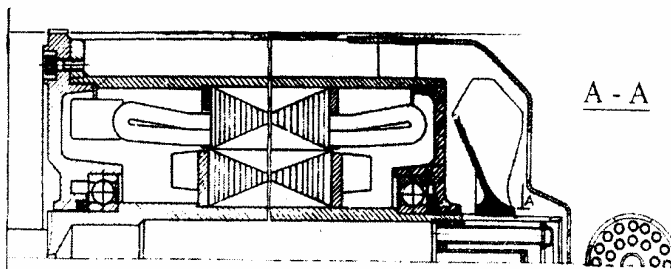


Рис. 2. Взрывозащищенный двигатель 2ЭДКОФ250 с ЦТТ в валу с трубчатой зоной конденсации (мощность 45-90 кВт).

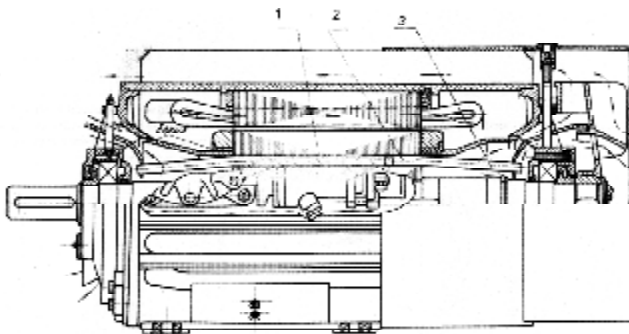


Рис. 3. Взрывозащищенный асинхронный двигатель с эксцентриковыми ЦТТ. 1 – ротор; 2 – зона нагрева ЦТТ; 3 – зона конденсации ЦТТ (мощность 132-3000 кВт)

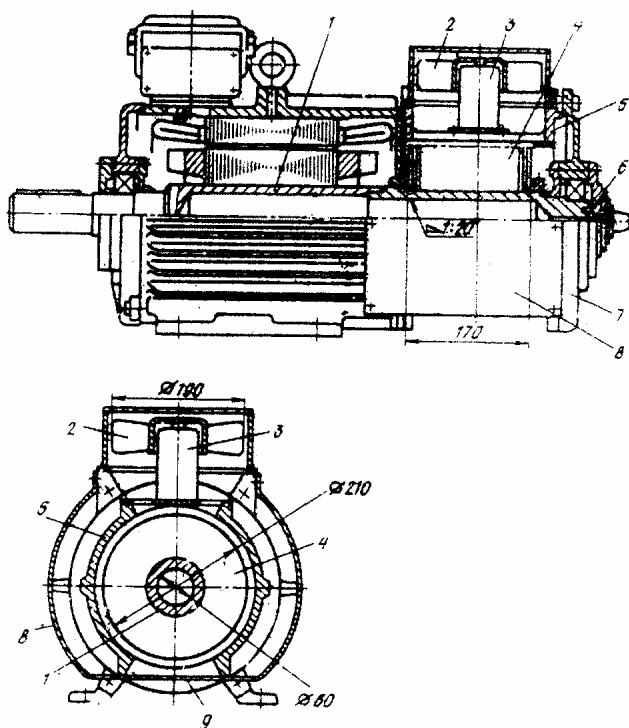


Рис. 4. Регулируемый асинхронный электродвигатель с высотой оси вращения 160 мм (мощность 1,1-22 кВт): 1 – вал-тепловая труба; 2 – вентилятор-наездник; 3 – привод вентилятора; 4 – радиатор; 5 – вставка; 6 – штенгель; 7 – подшипниковый щит; 8 – кожух; 9 – окно для выхода воздуха.

При применении ЦТТ в аксиальных каналах ротора крупных машин (до 3000 кВт) отпадает необходимость в энергозатратной аксиальной вентиляции со всеми ее атрибутами.

Способ охлаждения обладает двумя новыми качествами охлаждения ротора:

- предельной энергоэкономичностью;
- изотермичностью охлаждаемых поверхностей.

Энергоэкономичность заключается в том, что, независимо от габаритов и мощности машины, на охлаждение ротора не затрачивается внешняя энергия.

Изотермичность выражается предельно низким градиентом температур по длине охлаждаемых поверхностей ($T_{\max}/T_{\text{ср}} = 1,01-1,02$), рис. 5.

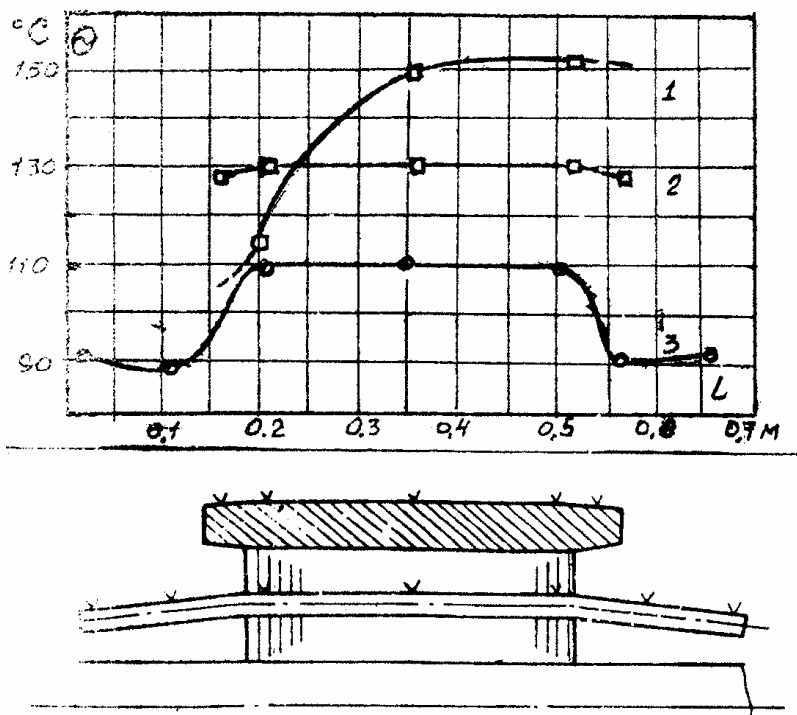


Рис. 5. Распределение превышения температуры двигателя по длине ротора двигателя при $H = 250$ мм.

1 – по длине к.з. обмотки ротора при вентиляции аксиальных каналов наружным воздухом; 2 – по длине к.з. обмотки ротора с установленными эксцентриковыми ЦТТ в аксиальных каналах; 3 – по длине ЦТТ, установленных в аксиальные каналы.

Величина эффективности ЦТТ зависит от исходных параметров типа и назначения машины, режима работы, частоты вращения, от соотношения длины к диаметру магнитопровода и других факторов.

Ниже приведены результаты исследований машин постоянного и переменного тока закрытого и взрывозащищенного исполнений с применением ЦТТ в роторе, выполненные рядом зарубежных фирм, в том числе в УкрНИИВЭ, (г. Донецк) в период 1970-1995 гг.; показаны их преимущества по сравнению с серийными двигателями.

1. Электрические машины постоянного и переменного тока с глубоким регулированием частоты вращения мощностью от 1,1 кВт до 22 кВт с ЦТТ в валу и независимой вентиляцией, рис. 1. Достигнуто увеличение длительного вращающегося момента (мощности) в 1,5-2,0 раза, увеличение к.п.д. на

7-10 %, и снижение массогабаритных показателей на 20-50 %.

2. Асинхронные двигатели с фазным ротором, типа МТГ (МТН), мощностью 7-11 кВт с ЦТТ в валу, рис. 1. Достигнуто снижение перегрева обмотки ротора на 42-48 °С (36-41 %), обмотки статора на 14-20 °С (14-15 %). Увеличение к.п.д. на 3-4 %. Это позволяет увеличить мощность двигателя на 27,0 или при сохранении мощности уменьшить расход активных материалов до 30 %.

3. Асинхронные двигатели с к.з. ротором общего исполнения с ЦТТ в валу, мощность 15-30 кВт, 2 Р = 2, 4, 6, 8), рис. 1. Достигнуто снижение превышения температуры обмотки статора на 19-13 °С (19-16 %), обмотки ротора – на 31-58 °С (31-40 %), увеличение к.п.д. на 0,8...1,3 %. Получено во ВНИТИЭМ (г.Владимир).

4. Во взрывозащищенных двигателях серии 2ВР с эксцентриковыми ЦТТ в аксиальных каналах ротора, рис. 3, достигнуто при номинальной мощности $P_2 = 110$ кВт снижение превышения температуры обмотки статора на 44 °С, обмотки ротора, на 137 °С, увеличение к.п.д. на 0,9 %, что позволяет увеличить мощность двигателя в том же габарите на 38 %.

5. Во взрывозащищенных двигателях серии ВАО2 (мощность 132-200 кВт) с эксцентриковыми ЦТТ в аксиальных каналах ротора, рис. 3, достигнуто, по сравнению с внутренней аксиальной вентиляцией, снижение превышения температуры обмотки статора на 50-55 °С, обмотки ротора на 100-110 °С, увеличение к.п.д. на 1,1-1,5 %, что позволяет увеличить мощность двигателя в тех же габаритах на 19-21 %.

При сохранении полученного соотношения «греющих» потерь к поверхности охлаждения, полученный результат распространяется, в первом приближении, на весь геометрически подобный ряд асинхронных двигателей с эксцентриковыми ЦТТ мощностью до 3000 кВт.

6. Асинхронные к.з. двигатели с повышенными потерями в роторе с ЦТТ в валу, рис. 1. Исследовано во ВНИТИЭМ (г.Владимир).

6.1. Двигатели с повышенным скольжением ($S = 4-7$ %) (мощность до 55 кВт) – достигнуто снижение превышения температуры обмотки статора на 12-27 °С, увеличение к.п.д. на 1,7-2,5 %.

6.2. Двигатели с массивным ротором (мощность до 30-45 кВт, скольжение до 17,5 %) – увеличение мощности (момента) в 1,7-2 раза, увеличение к.п.д. на 5-10 %.

7. Взрывозащищенные двигатели с к.з. ротором типа 2ЭДКОФ225 для привода шахтных конвейеров мощностью 55-110 кВт с ТТ в валу, рис. 2. Достигнуто снижение превышения температуры обмотки статора на 24-28 °С, обмотки ротора на 88-98 °С, увеличение к.п.д. на 0,4-0,6 % (выполнено в УкрНИИВЭ).

8. Тяговые двигатели постоянного тока типа ДРТ-13 (мощность 6,7 кВт в режиме S1) для шахтных аккумуляторных электровозов типа АМ-8Д.

Применение ЦТТ в валу, рис. 2, позволило в продолжительном режиме S1 снизить превышение температуры обмотки якоря на 25-30 °С, коллектора

на 10-15 °С, главных полюсов на 7-12 °С, добавочных полюсов на 12-15 °С, увеличение к.п.д. составило 1,6-1,9 %. В часовом режиме S2 эффект оказался меньшим. Работа выполнена УкрНИИВЭ совместно с СКБ завода «Электромашина», г. Харьков.

Для дальнейшего повышения эффективности охлаждения необходимо проектировать электрические машины с перераспределением и увеличением электромагнитных потерь в сторону ротора.

Ресурс безотказной работы ЦТТ составляет 30000-50000 ч. [3].

Промышленная технология изготовления валов с ЦТТ (вакуумирование, заправка теплоносителем, герметизация) может быть использована из опыта изготовления холодильных агрегатов бытовых холодильников.

В результате геополитической катастрофы – распада СССР в 1991г. – работы по исследованию и созданию украинских электрических машин прекратились.

Последовательная интеграция Украины с Европейским Союзом открывает широкие возможности для продвижения украинских товаров на рынки Европы. При этом создание конкурентоспособных товаров является одним из основных условий, которым определяется порядок их поставок. В этой связи разработка и промышленное производство конкурентоспособных по европейским показателям украинских электрических машин, в том числе с ЦТТ в роторе, являются чрезвычайно важной и актуальной задачей для крупнейших в Украине и Европе электромашиностроительных заводов.

Выводы.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность охлаждения роторов (якорей) электрических машин постоянного и переменного тока мощностью до 3000 кВт путем применения ЦТТ.

2. Применение ЦТТ позволяет создать по экстенсивности нагружения две модификации серий двигателей:

- энергоэкономичные двигатели с высокой надежностью и увеличенным к.п.д. на 4-6 % и $\cos \phi$ на 7-10%;

- двигатели для режимов работы S2 со сниженной на 10-15 % материалоемкостью.

3. В асинхронных двигателях с к.з. и фазным ротором мощностью от 132 кВт до 3000 кВт применение эксцентриковых ЦТТ в аксиальных каналах (пазах) ротора позволит отказаться от энергозатратной и металлоемкой внутренней аксиальной вентиляции и одновременно снизить длину двигателей до 10-15%.

4. Возобновить на Украине проведение НИОКР и освоить промышленное производство экономичных украинских электродвигателей постоянного и переменного тока мощностью до 3000 кВт и выше с ЦТТ в роторе (якоре), серий, конкурентоспособных по европейским стандартам.

Список литературы: 1. Us manufacture puts more metal in motors for higher efficiency.

Eles. Pev (Gr. Britt). 1976.199, № 19. **2.** Охлаждение промышленных электрических машин / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с. **3.** Тепловые трубы в электрических машинах / В. М. Петров, А. Н. Бурковский, Е. Б. Ковалев и др.; Под редакцией В. М. Петрова. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 152 с. **4.** Севостьянов В.А. Интенсификация охлаждения взрывозащищенных электродвигателей средней мощности: Автореф. дисс. канд. техн. наук. / Харьков, изд-во ХПИ, 1984. – 16 с. **5.** Бойко И.Г. Интенсификация охлаждения взрывозащищенных электродвигателей малой и средней мощности. Автореф. дис. канд. техн. / ХПИ. – Харьков, 1992. – 24 с. **6.** Севостьянов В.А. Целесообразность замены аксиальной вентиляции электрических машин новым способом охлаждения // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: УкрНИИВЭ, 2007. – С. 200-213.

Поступила в редколлегию 20.11.07